Détermination du rendement du moteur à air chaud comme moteur thermique

Objectifs expérimentaux

- Mesure de la chaleur Q_2 fournie à l'eau de refroidissement à chaque rotation.
- Mesure du travail mécanique W accompli à chaque rotation.
- Détermination du rendement η du moteur thermique.

Notions de base

Un moteur thermique prélève à chaque rotation la quantité de chaleur Q_1 d'un réservoir, accomplit le travail mécanique W et cède la chaleur Q_2 à un deuxième réservoir. En l'absence de pertes thermiques, l'énergie interne du système a la même valeur au début et à la fin; on a alors

$$Q_1 = Q_2 + W \qquad \text{(I)}.$$

Le moteur à air chaud ne présente pas ce comportement idéal vu qu'il a été optimisé à des fins didactiques. Les pièces transparentes du moteur permettent de suivre le processus de fonctionnement; on a entièrement renoncé à une isolation thermique de la culasse. Une grande partie de la puissance électrique délivrée « se perd » par conduction et rayonnement thermique. Cela signifie que

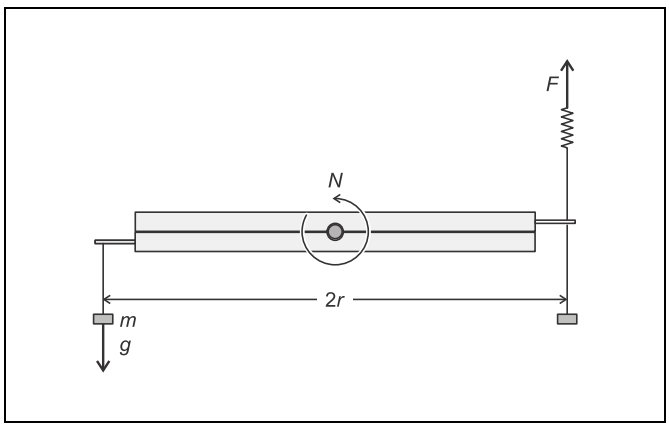
$$Q_1 > Q_2 + W \qquad \text{(II)}$$

On caractérise normalement de rendement du moteur thermique le rapport

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \qquad \text{(III)}.$$

Dans le cas du moteur à air chaud, il est cependant préférable de considérer comme rendement le rapport

$$\eta = \frac{W}{Q_2 + W} \qquad \text{(IV)}.$$



La chaleur Q_2 est cédée à l'eau de refroidissement du moteur à air chaud et se traduit là par une élévation de température. Une telle élévation de la température peut toutefois aussi être occasionnée par les pertes par frottement W_R du moteur à air chaud, en tout cas tant qu'il s'agit du frottement du piston dans le cylindre (voir P2.6.2.1). Ces pertes par friction doivent être prises en compte en tant que travail mécanique dans un bilan énergétique et ajoutées lors du calcul au travail mécanique accompli sur le volant.

Dans l'expérience, un frein dynamométrique de *Prony* exécute un couple N sur le vilebrequin du moteur à air chaud (voir fig. 1). Le moteur à air chaud est ainsi ralenti à une vitesse f. On a

$$W' = 2\pi \cdot N \qquad \text{(V)}$$

comme travail mécanique cédé à l'axe à chaque rotation et

$$W = W' + W_R \qquad \text{(VI)}$$

pour la totalité du travail mécanique accompli à chaque rotation.

La puissance P cédée à l'eau de refroidissement est déterminée à partir du changement de température $\Delta\vartheta$:

$$P = c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \Delta\vartheta \qquad \text{(VII)}$$

c = 4,185 J g^{-1} K^{-1}: chaleur spécifique de l'eau,
ρ = 1 g cm^{-3}: densité de l'eau
$\frac{\Delta V}{\Delta t}$: débit-volume de l'eau de refroidissement

Le résultat obtenu permet de calculer la chaleur cédée à l'eau de refroidissement à chaque rotation

$$Q'_2 = \frac{P}{f} \qquad \text{(VIII)}$$

et la chaleur Q_2 à ramener au cycle proprement dit

$$Q_2 = Q'_2 - W_R \qquad \text{(IX)}.$$

Fig. 1 Frein dynamométrique de Prony pour la génération d'un couple freinant $N = (F + m \cdot g) \cdot r$

Matériel

1 moteur à air chaud	388 182
1 lot d'accessoires pour moteur à air chaud	388 221
1 noyau en U avec joug	562 11
1 dispositif de serrage	562 12
1 bobine secteur à 500 spires	562 21
1 bobine TBT à 50 spires	562 18
1 multimètre METRAmax 2	531 100
1 multimètre METRAmax 3	531 712
1 jeu de 12 masses marquées de 50 g	342 61
1 dynamomètre de précision 1,0 N	314 141
1 compteur P	575 45
1 barrière lumineuse, lumière infrarouge	337 46
1 transformateur, 6 V~,12 V~/30 VA	562 73
1 câble adaptateur, à 4 pôles, 1,5 m	501 18
1 thermomètre, –10° à + 40 °C	382 36
1 bécher en plastique, 1000 ml	590 06
1 chronomètre manuel II, 60 s/30 min	313 17
2 pieds en V, petit modèle	300 02
1 tige, 25 cm	300 41
1 tige, 47 cm	300 42
1 tige en équerre	300 51
2 noix Leybold	301 011

Câbles d'expérience (en partie avec une section de 2,5 mm^2)

Supplément nécessaire:

Récipient d'eau ouvert (au moins 10 l)

1 pompe submersible 12 V	388 181
1 alimentation TBT	522 16
2 tuyaux en silicone ∅ int. 7 × 1,5 mm, 1 m	667 194

ou

arrivée et écoulement de l'eau de refroidissement

Montage

Le montage expérimental est représenté sur la fig. 2.

Mesure de la température dans l'eau de refroidissement:

– Dévisser le raccord à filetage GL14 de l'écoulement de l'eau de refroidissement de la culasse et monter l'adaptateur pour température **(a)** fourni avec les accessoires pour le moteur à air chaud (voir mode d'emploi 388 221).
– Introduire le thermomètre, –10° à + 40 °C, dans l'adaptateur pour température et le fixer avec le raccord à filetage GL18.

Alimentation en eau de refroidissement:

– Verser au moins 10 l d'eau dans le récipient d'eau ouvert et attacher la pompe submersible.
– Brancher la sortie de la pompe submersible à l'arrivée d'eau de refroidissement du moteur à air chaud et amener l'écoulement de l'eau de refroidissement dans le récipient d'eau.
– Brancher la pompe submersible à l'alimentation TBT.

ou

– Brancher l'arrivée d'eau de refroidissement du moteur à air chaud au robinet d'eau et amener l'écoulement de l'eau de refroidissement dans le déversoir.

Alimentation en tension:

– Monter le couvercle de la culasse avec filament chauffant (respecter la marque, voir mode d'emploi du moteur à air chaud).
– Tourner le volant moteur et vérifier l'étanchéité du moteur à air chaud; éventuellement fermer le collier de serrage pour le capteur de pression avec le bouchon prévu à cet effet.
– Monter le transformateur démontable et brancher la sortie de 12 V avec ampèremètre-voltmètre (plage de mesure 10 A) aux douilles de 4 mm du couvercle pour la culasse.

Conseils de sécurité

Le moteur à air chaud fonctionnant en moteur thermique ne démarre pas automatiquement et s'arrête, par exemple après une coupure de courant. Un blocage des bielles et du vilebrequin peut également susciter un arrêt du moteur. En cas d'arrêt, la chaleur délivrée à la culasse n'est pas suffisamment dissipée.

- Respecter les instructions spécifiées dans le mode d'emploi du moteur à air chaud.
- Lorsque la machine est à l'arrêt, ne pas chauffer la culasse en permanence.
- Ne faire fonctionner le moteur à air chaud que sous surveillance.
- En cas d'arrêt du moteur, immédiatement arrêter le chauffage électrique.
- Protéger les bielles et le vilebrequin contre l'accès par des personnes non autorisées par la mise en place de la grille de protection.

Les éléments en verre du moteur à air chaud ne doivent pas être soumis à une trop grande sollicitation thermique.

- Ne pas faire fonctionner le moteur à air chaud sans eau de refroidissement et s'assurer du bon fonctionnement du circuit d'eau de refroidissement.
- Veiller à ce que la température de l'eau de refroidissement alimentée ne dépasse pas 30 °C.
- Ne pas porter le filament chauffant à des températures élevées (incandescence jaune) en fonctionnement permanent et en tout cas, seulement lorsque le moteur tourne rapidement.

Attention: le couvercle de la culasse et les douilles de connexion chauffent énormément en cas d'utilisation prolongée avec une puissance de chauffe maximale.

- Monter la grille de protection du cylindre.
- Laisser refroidir le moteur à air chaud avant d'enlever les câble de connexion ou avant de changer le couvercle pour la culasse.

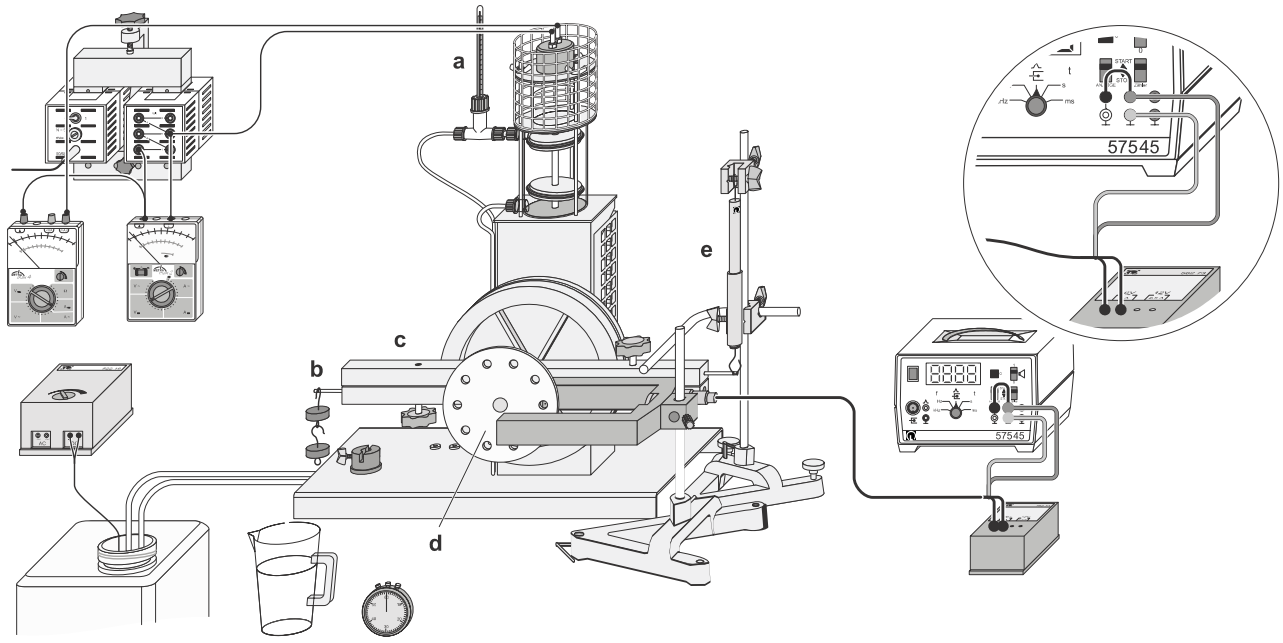


Fig. 2 Montage expérimental pour la détermination du rendement du moteur à air chaud comme moteur thermique

Mesure de la fréquence:

– Apposer sur le vilebrequin le disque à trous **(d)** inclus aux accessoires pour le moteur à air chaud.
– Monter la barrière lumineuse sur le petit pied en V et l'orienter vers un trou du disque immobile.
– Utiliser le câble adaptateur à quatre pôles pour brancher la barrière lumineuse à la sortie 6 V du transformateur pour l'alimentation en tension (connecteur noir) et à l'entrée de mise en marche du compteur P pour la mesure de la fréquence (connecteurs rouge et gris).
– Relier l'entrée de mise en marche à l'entrée d'arrêt, positionner le commutateur sur «f» et enclencher le compteur P.

Mesure du débit de l'eau de refroidissement:

– Garder le bécher en plastique et le chronomètre manuel à portée de la main.

Réalisation

a) Marche à vide

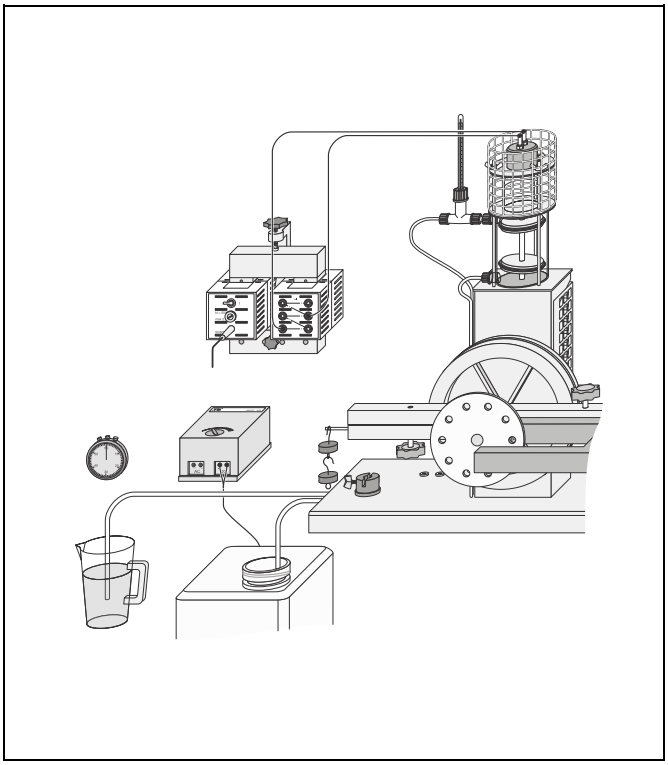
D'abord:

– Enclencher l'alimentation en eau de refroidissement (pour ce faire, régler par ex. l'alimentation TBT pour la pompe submersible sur la position 2), vérifier le débit et attendre que l'eau reflue par le tuyau d'écoulement.
– Amener le tuyau d'écoulement dans le bécher en plastique et déterminer le débit-volume ΔV de l'eau de refroidissement par intervalle de temps Δt (voir fig. 3).
– Mesurer la température ϑ de l'eau de refroidissement à intervalles de 2 minutes et attendre que l'évolution soit clairement extrapolable.

Ensuite:

– Mettre en route le transformateur démontable avec une tension de sortie U = 12 V.

Fig. 3 Détermination du débit-volume ΔV par unité de temps Δt



Dès que le filament chauffant est rouge incandescent:

– Lancer le moteur à air chaud en faisant tourner le volant moteur dans le sens horaire.

Si le moteur à air chaud ne démarre pas malgré plusieurs tentatives:

– Arrêter le transformateur démontable et vérifier le montage.

Dès que le moteur à air chaud fonctionne de lui-même:

– Réduire la tension de chauffage à U = 8 V.

– Mesurer la vitesse de rotation f du moteur à air chaud et la noter.

  La vitesse de rotation du moteur s'obtient à partir de la fréquence mesurée et du nombre de trous du disque à trous.

– Continuer de mesurer la température de l'eau de refroidissement toutes les 2 minutes, observer l'élévation de la température et attendre que la valeur maximale soit atteinte.

Pour finir:

– Arrêter le transformateur démontable sans cesser d'observer l'évolution de la température de l'eau de refroidissement.
– Déterminer le changement de température $\Delta\vartheta$ de l'eau de refroidissement et le noter.

Note:

Si le volume de la réserve d'eau de refroidissement est trop faible, la température dans le réservoir va augmenter elle aussi. Le changement de température $\Delta\vartheta$ mesuré doit alors être corrigé en conséquence.

– Recommencer la mesure avec les tensions de chauffage U = 10 V, 12 V et 14 V.

b) Fonctionnement avec le frein dynamométrique de *Prony*:

D'abord:

– Placer les deux moitiés du frein dynamométrique de *Prony* **(c)** sur le vilebrequin du moteur à air chaud, légèrement serrer les vis moletées et orienter le frein dynamométrique à l'horizontale.
– Monter la tige de 47 cm sur le petit pied en V et y fixer la tige en équerre.
– Fixer le dynamomètre de précision 1,0 N **(e)** à la tige avec la noix Leybold, accrocher l'oeillet « droit » du frein dynamométrique de *Prony* et ajuster le zéro du dynamomètre.

Ensuite:

Note:

La machine ne doit pas s'arrêter du fait de la charge mécanique. En cas d'arrêt, immédiatement relancer la machine à la main ou immédiatement arrêter le chauffage électrique.

– Régler la force de frottement souhaitée en vissant les deux moitiés du frein dynamométrique de *Prony*.
– Pour la compensation de la force de frottement, accrocher une masse marquée de 50 g **(b)** du côté gauche.
– Faire fonctionner le moteur à air chaud avec une tension de chauffage U = 14 V tout en observant l'évolution de la température du liquide de refroidissement.
– Relever la force F sur le dynamomètre de précision.

Couple freinant: $N = (F + m \cdot g) \cdot 0{,}25$ m

– Déterminer l'élévation de la température de l'eau de refroidissement.

– Augmenter la force de frottement du frein dynamométrique de *Prony* et recommencer la mesure.

Exemple de mesure

Débit-volume de l'eau de refroidissement: 780 cm^3 en 5 min

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{780\ \text{cm}^3}{300\ \text{s}} = 2{,}6\ \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

a) Marche à vide:

Tableau 1: Tableau de mesure pour la marche à vide

$\frac{U}{\text{V}}$	$\frac{I}{\text{A}}$	$\frac{f}{\text{s}^{-1}}$	$\frac{\Delta\vartheta}{°\text{C}}$
8	7,6	1,6	3,3
10	9,4	4,2	5,3
12	>10	6,0	7,7
14	>10	7,4	10,0

b) Fonctionnement avec le frein dynamométrique de Prony:

Tableau 2: Tableau de mesure pour le fonctionnement avec le frein dynamométrique de Prony (tension de chauffage U = 14 V)

$\frac{f}{\text{s}^{-1}}$	$\frac{\Delta\vartheta}{°\text{C}}$	$\frac{m}{50\ \text{g}}$ *	$\frac{F}{\text{N}}$ *
6,0	8,6	1	0,13
5,3	8,2	1	0,33
4,2	6,6	2	0,10

* couple freinant: $N = (F + m \cdot g) \cdot 0{,}25$ m

Exploitation et résultat

Le tab. 3 contient des données calculées à partir des grandeurs mesurées en fonction de la tension de chauffage U et du couple freinant N: la vitesse de rotation f du moteur à air chaud respectivement atteinte, le travail de frottement du piston W_R (prélevé de l'expérience P2.6.1.1), la chaleur Q_2 (calculée selon (VII)-(IX)) cédée à l'eau de refroidissement par le cycle à chaque rotation et la totalité du travail mécanique W accompli (calculé selon (V) et (VI)).

Le rendement η se détermine à partir des deux dernières grandeurs, conformément à (IV) (voir tab. 4). Les fig. 4 à 6 montrent les dépendances sous forme graphique.

Tableau 3:

$\frac{U}{\mathrm{V}}$	$\frac{N}{\mathrm{N \cdot m}}$	$\frac{f}{\mathrm{s^{-1}}}$	$\frac{W_R}{\mathrm{J}}$	$\frac{W}{\mathrm{J}}$	$\frac{Q_2}{\mathrm{J}}$
8	0	1,6	2,6	2,6	19,8
10	0	4,2	1,0	1,0	12,7
12	0	6,0	1,0	1,0	13,0
14	0	7,4	1,0	1,0	13,7
14	0,16	6,0	1,0	2,0	14,6
14	0,21	5,3	1,0	2,3	15,8
14	0,27	4,2	1,0	2,7	16,1

Tableau 4:

$\frac{U}{\mathrm{V}}$	$\frac{N}{\mathrm{N \cdot m}}$	$\frac{f}{\mathrm{s^{-1}}}$	η
8	0	1,6	0,12
10	0	4,2	0,07
12	0	6,0	0,08
14	0	7,4	0,07
14	0,16	6,0	0,12
14	0,21	5,3	0,13
14	0,27	4,2	0,14

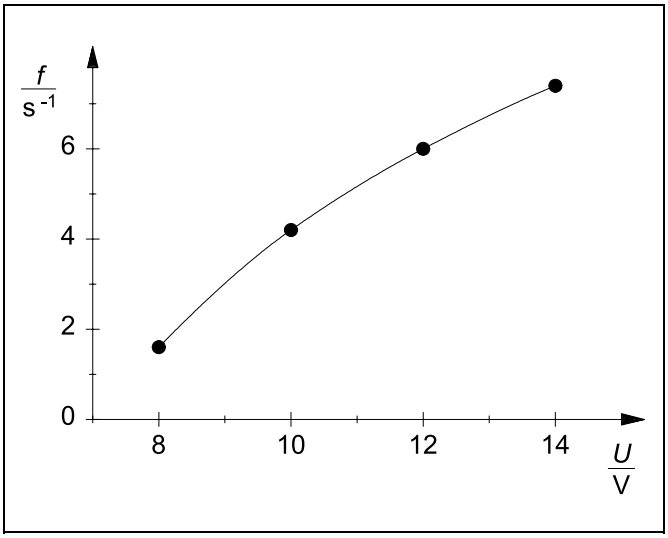


Fig. 4 Vitesse de rotation f du moteur à air chaud non freiné en fonction de la tension de chauffage U

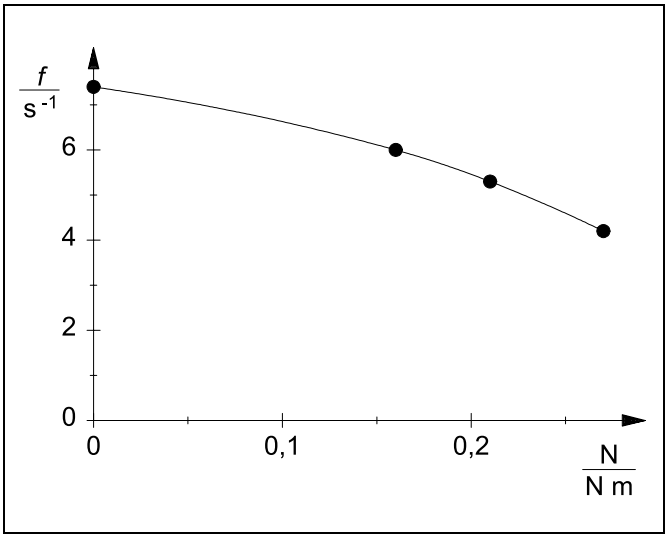


Fig. 5 Vitesse de rotation f du moteur à air chaud en fonction du couple freinant N (pour la tension de chauffage U = 14 V)

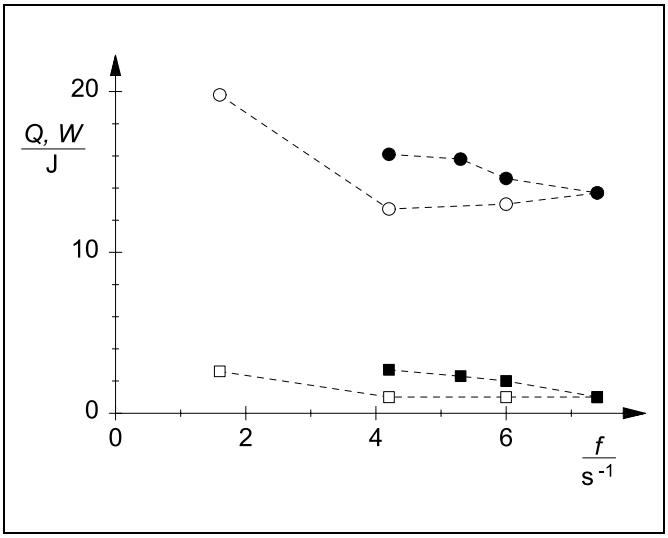


Fig. 6 Influence de la vitesse de rotation f sur les grandeurs Q_2 et W
● : chaleur Q_2 en fonctionnement freiné
○ : chaleur Q_2 en marche à vide
■ : travail mécanique W en fonctionnement freiné
□ : travail mécanique W en marche à vide

© by Leybold Didactic GmbH
Printed in the Federal Republic of Germany
Technical alterations reserved